

## 새로운 구조의 강건한 외란관측기 설계

박주광<sup>\*,1)</sup><sup>1)</sup> 국방과학연구소 제3기술연구본부

## A Design of the New Robust Disturbance Observer

Jukwang Park<sup>\*,1)</sup><sup>1)</sup> The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 28 August 2015 / Revised 22 December 2015 / Accepted 29 April 2016)

## ABSTRACT

This paper proposes a new disturbance observer(DOB). The purpose of the DOB is to realize the plant performing like a model in the presence of disturbances which come from external environment and inherent nonlinearities and uncertainties in the plant. It is shown that the proposed DOB compensates those disturbances, nonlinearities and uncertainties, effectively. And it is theoretically proved that the proposed DOB can be guaranteed its stability for the stable plant. Its availability is shown by applying the DOB to the stabilization platform for EOTS(Electro Optical Tracking System).

Key Words : Disturbance Observer, Internal Stability, Electro Optical Tracking System, LOS Stabilization

## 1. 서론

외란관측기는 외부에서 플랜트로 인가되는 외란과 플랜트 내부의 마찰 및 모델에 포함되지 못한 불확실성 등을 포함하는 경우에도 모델과 같이 동작하도록 하는 것이 목적이다. 외란관측기는 Inverse dynamic 제어이론을 기반으로 Ohnishi<sup>[1]</sup>에 의하여 제안되었다. Umeno와 Hori<sup>[2]</sup> 및 Shin과 Yamada<sup>[3]</sup> 등은 2 자유도 제어이론을 이용한 외란관측기를 설계하였다. Tomizuka<sup>[4]</sup>는 기계적 시스템 제어를 위한 외란관측기를 제안하

였다. 그러나 안정도가 보장되는  $Q(s)$  필터 선정과 시행착오적인 설계방법은 해결해야할 과제였다. Choi와 Chung<sup>[5]</sup>는  $H_\infty$  제어이론을 도입하고, Kim과 Chung<sup>[6]</sup>은 RIC(Robust Internal-loop Compensator) 이론을 도입하여 안정성이 보장된 외란관측기를 제안하고자 하였다.

본 논문에서는 새로운 강건한 외란관측기 구조를 제안하였으며, 주파수영역에서의 설계방법을 제시하였다. 외란관측기는 플랜트 불확실성을 관측하고 보상하는 내부루프 및 시스템 성능을 확장시키기 위한 외부루프로 구성된다. 제안된 외란관측기로 구성된 내부루프는 플랜트에 발생하는 외란 및 불확실성을 감지하고 제어신호를 발생함으로써 제어성능을 개선한다. 또한 실제 플랜트 동특성이 모델 동특성으로 변환됨과 외

\* Corresponding author, E-mail: jupark@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

란 감쇄효과를 전자광학추적기(Electro Optical Tracking System, EOTS)<sup>[7,8]</sup>의 안정화구동장치(Stabilized Platform)에 적용하고 분석하였다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 Ohnishi가 제안한 외란 관측기

Ohnishi<sup>[1]</sup>는 Inverse dynamic 제어이론을 기반으로 외란관측기를 제안하였으며, 구조는 Fig. 1과 같다.

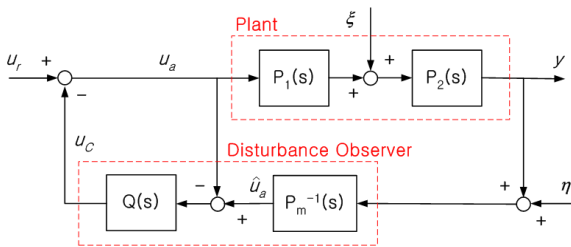


Fig. 1. Disturbance observer structure

여기서  $u_r$ 은 기준제어입력이고,  $\xi$ 는 외란,  $\eta$ 는 측정잡음이다. 외란  $\xi$ 는 외란 및 마찰, 불확실성 등을 포함한다. 측정오차  $\eta$ 는 측정센서에 포함되는 요소이다. 플랜트 입력신호  $u_a$ 와 모델의 역  $[P_m(s)]^{-1}$ 을 통한 계산된 입력신호  $\hat{u}_a$ 와 비교하여 오차를 구하고, 필터  $Q(s)$ 를 통하여 보상신호  $u_c$ 를 구한다. 여기서 실제 플랜트와 플랜트 모델은 각각 식 (1)과 식 (2)에 보였다.

$$P(s) = P_1(s)P_2(s) \quad (1)$$

$$P_m(s) = P_{m1}(s)P_{m2}(s) \quad (2)$$

여기서 모델  $P_{m1}(s)$ 과  $P_{m2}(s)$ 는 각각  $P_1(s)$ 과  $P_2(s)$ 의 모델이다.

Fig. 1의 외란관측기의 구조식은 식 (3)과 같다.

$$u_a = u_r - u_c \quad (3,a)$$

$$u_c = Q(s) \left[ -u_a + \frac{1}{P_m(s)}y + \frac{1}{P_m(s)}\eta \right] \quad (3,b)$$

$$y = P(s)u_a + P_2(s)\xi \quad (3,c)$$

식 (3)으로부터 외란관측기의 보상신호  $u_c$ 를 구하면 식 (4)와 같다.

$$u_c = \Omega_{Eu}(s) [\Delta(s)u_r + P_2(s)\xi + \eta] \quad (4)$$

여기서

$$\Delta(s) = P(s) - P_m(s) \quad (5)$$

$$\Omega_{Eu}(s) = \frac{Q(s)}{P_m(s) + \Delta(s)Q(s)} \quad (6)$$

이다. 식 (4)를 식 (3,c)에 대입하면 플랜트 출력  $y$ 는 식 (7)과 같다.

$$y = \Omega_E(s) \left[ P_m(s)u_r - \frac{P_m(s)}{P_1(s)} \{Q(s) - 1\} \xi + Q(s)\eta \right] \quad (7)$$

여기서

$$\Omega_E(s) = \frac{P(s)}{P_m(s) + \Delta(s)Q(s)} \quad (8)$$

이다. 필터  $Q(s)$ 는 외란관측기의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 식 (7)에서 기존 외란관측기는 외란  $\xi$ 를 감쇠시키기 위하여  $Q(s)$ 는 단위이득의 저역필터로 설계하며, 이때 플랜트는 모델로 특성이 변화한다. 그러나  $Q(s)$  설계는 시행착오적인 설계방법에 의존하였으며, 모델 오차 동특성  $\Delta(s)$ 이  $\Omega_E(s)$ 의 전달함수 분모 항에 위치하여  $Q(s)$  필터의 설계에 따라 불안정한 특성이 발생하기도 한다.

### 2.2 새로운 구조의 외란관측기

본 절에서는 Fig. 2와 같은 새로운 구조의 외란관측기를 제안하였다. 여기서  $K_y$ 는 입력이득상수로서 외란관측기의 이득을 조절하는 요소이다. 외란관측기 입력은 플랜트의 기준제어신호  $u_r$ 과 센서를 통하여 측정된 플랜트 출력신호로 구성된다. 측정된 플랜트 출력은 센서잡음  $\eta$ 를 포함한다. 플랜트의 기준제어신호  $u_r$ 는 입력이득상수  $K_y$ 와 플랜트 모델  $P_m(s)$ 을 통과하며, 측정된 플랜트 출력과 비교하여 플랜트 모델과 실제 플랜트 사이의 오차를 발생한다. 이 오차는 필터  $G_c(s)$ 를 통하여 보상신호  $u_c$ 를 발생한다.

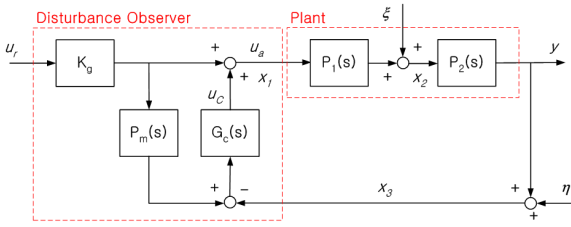


Fig. 2. Proposed disturbance observer

Fig. 2의 관계는 식 (9)와 같다.

$$u_a = K_g u_r + u_c \quad (9,a)$$

$$u_c = G_c(s) [K_g P_m(s) u_r - y - \eta] \quad (9,b)$$

$$y = P(s) u_a + P_2(s) \xi \quad (9,c)$$

식 (9)를 정리하면 제안된 외란관측기의 보상신호  $u_c$ 는 식 (10)과 같다.

$$u_c = -\Omega_{Nu}(s) [K_g \Delta(s) u_r + P_2(s) \xi + \eta] \quad (10)$$

여기서

$$\Omega_{Nu}(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) P(s)} \quad (11)$$

이다.

식 (10)을 식 (9,c)에 대입하여 정리하면 플랜트 출력  $y$ 는 식 (12)와 같다.

$$y = \Omega_N(s) \left[ K_g \left\{ \frac{1}{G_c(s)} + P_m(s) \right\} u_r + \frac{1}{G_c(s) P_1(s)} \xi + \eta \right] \quad (12)$$

여기서

$$\Omega_N(s) = \frac{G_c(s) P(s)}{1 + G_c(s) P(s)} \quad (13)$$

이다.

본 논문에서 제안한 외란관측기는  $G_c(s)$ 의 설계에 따라 외란감쇄 특성이 변화한다.  $|G_c(s) P(s)|$ 가 단위 이득보다 크도록  $|G_c(s)|$ 를 크게 선정할 경우를 가정

하자. 이 경우  $|\Omega_N(s)| = 1$ 이 되며, 입력이득상수  $K_g$ 는 '1'로 설정한다. 한편, 식 (11)에서  $|G_c(s) P(s)|$ 가 단위이득을 무시할 수 있을 정도로  $|G_c(s)|$ 를 선정할 경우 플랜트 출력은  $|\Omega_N(s)|$ 만큼 감소한다. 예를 들어  $|\Omega_N(s)| = 0.5$ 인 경우, 입력이득상수  $K_g$ 는 '2'로 설정한다. 이 경우에도 식 (12)로부터 외란관측기의 적용으로 플랜트가 모델을 추종하기 위해서  $|G_c(s)|$ 가 단위이득 보다 커야하며, 외란  $\xi$ 를 효과적으로 감쇠하기 위해서  $|G_c(s) P_1(s)|$ 가 단위보다 이득이 커야함을 알 수 있다. 위의 경우 모두 외란관측기는  $|Q(s)|$ 가 1인 기존의 외란관측기와 동일한 특성을 발생한다.

### 3. 안정도 해석

내부 안정도 이론<sup>[9]</sup>에 따라 제안된 외란관측기의 안정도를 분석하였다. Fig. 2는 식 (14)와 같이 정리된다.

$$x_1 = K_g u_r + G_c(s) [K_g P_m(s) u_r - x_3] \quad (14,a)$$

$$x_2 = \xi + P_1(s) x_1 \quad (14,b)$$

$$x_3 = \eta + P_2(s) x_2 \quad (14,c)$$

식 (14)를 플랜트 입력에 대하여 정리하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} u_r \\ \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_m(s)}{\Gamma(s)} & 0 & \frac{G_c(s)}{\Gamma(s)} \\ -P_1(s) & 1 & 0 \\ 0 & -P_2(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서

$$\Gamma(s) = K_g (1 + G_c(s)) P_m(s) \quad (16)$$

이다. 식 (15)에서 내부변수로 정리하면 식 (17)와 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \Psi(s) \begin{bmatrix} \Gamma(s) & -G_c(s) P_2(s) & -G_c(s) \\ \Gamma(s) P_1(s) & P_m(s) & -G_c(s) P_1(s) \\ \Gamma(s) P(s) & P_m(s) P_2(s) & P_m(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r \\ \xi \\ \eta \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서

$$\Psi(s) = \frac{1}{P_m(s) + G_c(s)P(s)} \quad (18)$$

이다. 식 (18)의 분모항에서  $G_c(s)$ 와  $P_m(s)$ 은 설계자가 설계하는 요소이다. 그러므로  $G_c(s)$ 와  $P_m(s)$ 의 극점과 영점을 극좌표계 좌방면에 위치하도록 선정하면, 안정한 플랜트에 대하여 내부 안정도가 보장된다.

#### 4. 전자광학추적기 제어기 설계 및 실험결과

##### 4.1 전자광학추적기 소개

전자광학추적장비(Electro Optical Tracking System, EOTS)<sup>[7,8]</sup>는 항공기나 함정, 차량 등에 탑재되며, 플랫폼의 운항이나 엔진 등에 의하여 발생하는 진동이 인가되어도 흔들림 없는 안정화된 영상을 획득하고, 표적을 자동추적하는 장비이다.

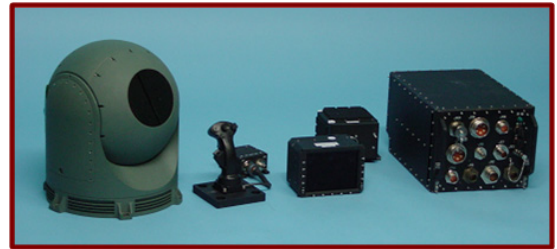


Fig. 3. Figure of EOTS

EOTS는 Fig. 3과 같이 안정화 짐발(Stabilized Payload Assembly, SPA)와 전자상자(Gimbal Electronic Box, GEB)로 구성되며, EOTS 구동 메커니즘은 Fig. 4에 보였다. SPA는 열영상 센서(Forward Looking Infra-Red, FLIR) 및 주간 카메라(Day Light TV, DLTV), 레이저 거리 측정기(Laser Range Finder, LRF) 등의 영상센서로 구성되며, 영상센서는 내부 짐발(Inner Gimbal)에 견고하게 장착되어 방위각과 고각으로 구동된다. 또한 외부 짐발은 방위각과 고각으로 구동되며, 내부 짐발을 추종한다. 각 구동축은 안정화가 이루어지므로 4축

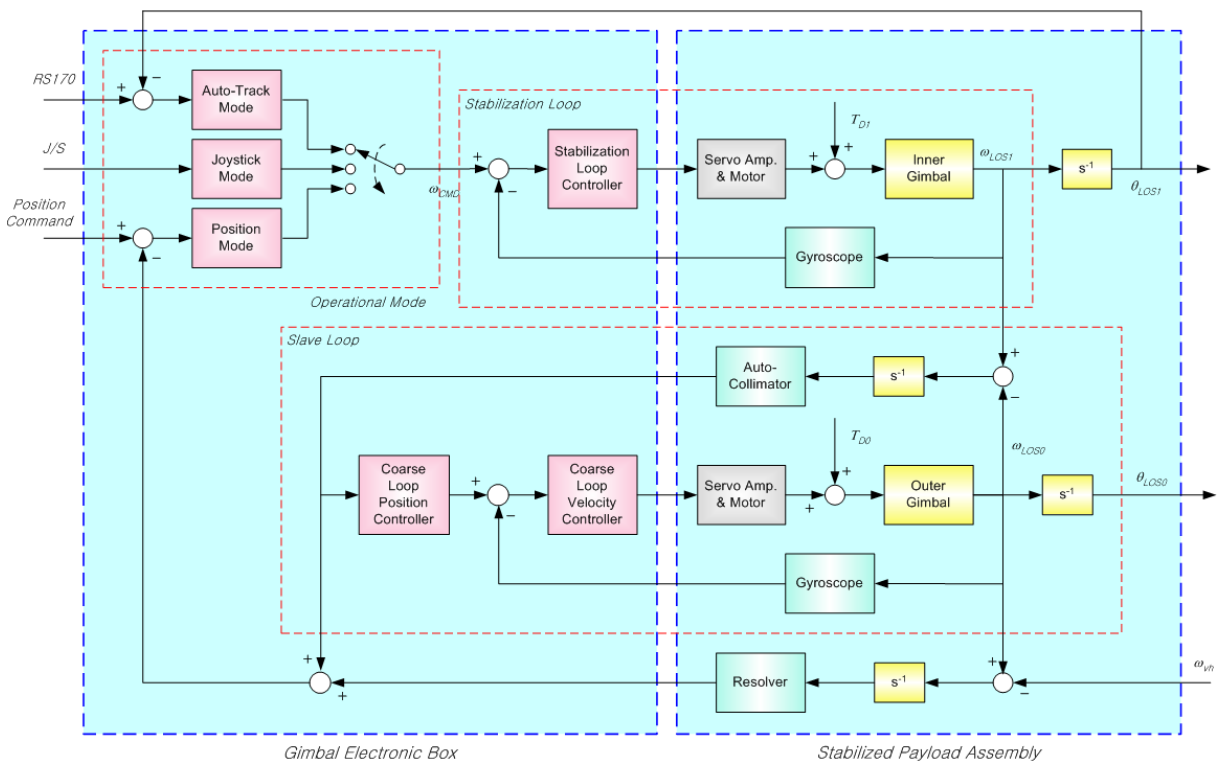


Fig. 4. Block diagram of the electro-optical tracking system

집발, 4축 안정화(4 axis gimbal, 4 axis stabilization)로 구성된다. GEB는 각종 전자보드 및 전원공급기로 구성된다. 전자보드는 안정화 제어기, 시스템 제어기, 영상처리 및 추적기 등으로 구성된다.

제안된 DOB를 안정화루프(stabilization loop)에 적용하여 제어기를 구성하였다. 내부 집발은 여러 가지 영상센서를 제한된 공간에 배치하여 큰 값의 관성행렬의 off-diagonal 항들이 존재한다. 또한 구동축의 베어링에서 발생하는 마찰과 외부에서 인가되는 진동에 의한 품질저하를 발생한다. 본 논문에서는 이러한 성능저하 요소가 존재함에도 안정하게 동작하면서 성능이 개선됨을 보였다.

#### 4.2 안정화구동기 모델링

플랜트는 자이로 및 굴림대, 서보증폭기/모터, 제어기 등으로 구성된다. 자이로 신호는 각속도 명령  $\omega_{CMD}$ 와 비교하여 오차신호를 발생하며, 오차신호는 제어기를 통하여 굴림대의 각속도와 반대되는 제어신호를 발생한다. 제어신호는 서보증폭기를 통하여 모터로 인가되며, 굴림대를 회전하도록 한다.

서보증폭기/모터는 전류계환 형태로 구성되며, 직류이득은 0.3 A/V, 모터 토크상수는 47.1 oz-in/A이다. 서보증폭기/모터의 대역폭은 안정화루프 대역폭보다 상당히 크므로 식 (19)와 같이 상수로 간략화 할 수 있다.

$$P_1(s) = 14.13 \quad (19)$$

굴림대는 영상센서를 지지하며, 모터에서 발생한 토크에 의하여 회전한다. 이때 굴림대에는 토크외란  $T_D$ 와 각속도 외란  $\omega_{vh}$ 에 의한 외란이 발생한다. 토크외란  $T_D$ 는 탑재부위에서 발생한 진동이 굴림대의 무게불균형과 결합되어 발생되며, 각속도 외란  $\omega_{vh}$ 은 탑재장비의 각운동에 의하여 발생되며 굴림대의 마찰과 결합하여 토크에 영향을 미치게 된다. 굴림대의 관성모멘트는 1.65 [oz-in-sec<sup>2</sup>]이며, 선형 시스템 모델은 식 (20)과 같다.

$$P_2(s) = \frac{0.61}{s} \quad (20)$$

자이로는 관성평면에 대한 굴림대 각속도를 감지하여 전기신호로 발생한다. 직류이득은 4.77 V/rad/sec, 대

역폭 80 Hz, 댐핑비 0.5의 각속도 출력 자이로로 모델하였다. 자이로 출력신호는 증폭기를 통하여 약 11배 증폭되며, 앨리어싱을 방지하기 위하여 1 kHz 저역필터를 통과한다. 이 신호는 12 bit 분해능, 2 kHz 샘플링 주파수로 A/D 변환된다.

#### 4.3 제어기 설계

플랜트의 보드선도는 Fig. 5와 같다.

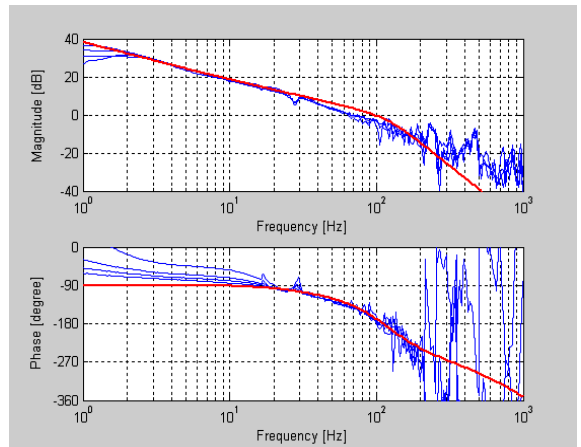


Fig. 5. Plant frequency response

굴림대의 관성 적분기(inertial integrator)에 의하여 저주파에서의 이득곡선은 -20 dB/decade이며, 위상은 90° 지연된 1형 시스템이다. 80 Hz 이상의 주파수에서는 자이로에 의하여 이득곡선은 -60 dB/decade 기울기를 갖으며, 위상은 90° 이상 지연이 발생한다. 플랜트 모델은 식 (21)과 같이 설계하였다.

$$P_m(s) = \frac{450}{s} \quad (21)$$

$P_m(s)$ 과 외란관측기 보상기  $G_c(s)$ 의 곱이 저주파 대역에서 상수 '1'이 되도록  $G_c(s)$ 의 전달함수는 식 (22)로 설정하였다.

$$G_c(s) = 1.34 \frac{s}{s + 2\pi 50} \quad (22)$$

따라서 입력이득 상수  $K_y$ 는 '2'로 설정하였으며, 분모항의 저역필터는 전기적 잡음을 줄이기 위하여 구성

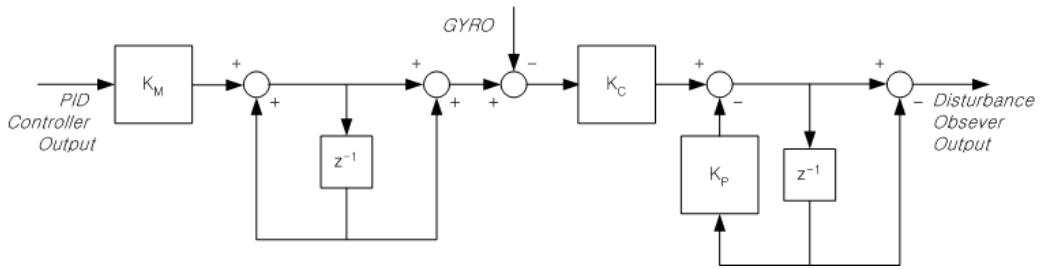


Fig. 6. Disturbance observer model

하였다. Fig. 6은 식 (21)과 식 (22)의 외란관측기를 블록도이다. 여기서 외란관측기 파라미터는 쌍선형변환 (bilinear transformation)을 통하여 디지털화하였다. 안정화 제어기 출력은 식 (21)의 플랜트 모델을 통하여 자이로 신호와 비교되고, 이 오차는 식 (22)의 외란관측기를 통하여 보상신호를 발생한다.

Fig. 7은 플랜트 출력이 외란관측기 보상기  $G_c(s)$ 를 통과하였을 경우 주파수응답을 측정한 것이며, 연속시간 주파수영역에서 설계된 안정화 제어기 전달함수  $G_S(s)$ 는 식 (23)과 같다.

$$G_S(s) = \frac{22.5(s + 2\pi 10)(s + 2\pi 7.2)}{s^2(s + 2\pi 100)} \quad (23)$$

안정화 제어기는 쌍선형변환을 통하여 디지털화하였으며, Fig. 8은 식 (24)의 디지털 안정화 제어기의 블록도이다. 적분기에 포함되어있는 제한기는 적분기 anti-windup을 목적으로 설치하였다. 첫 번째 적분기의 제한기는 제어기 이득  $K_{DK}$ 을 통과한 적분기 출력이 D/A 변환기를 포화시킬 수 있는 값으로 설정하였으며,

마지막 적분기의 제한기는 적분기 출력이 D/A 변환기를 포화시킬 수 있는 값으로 설정하였다.

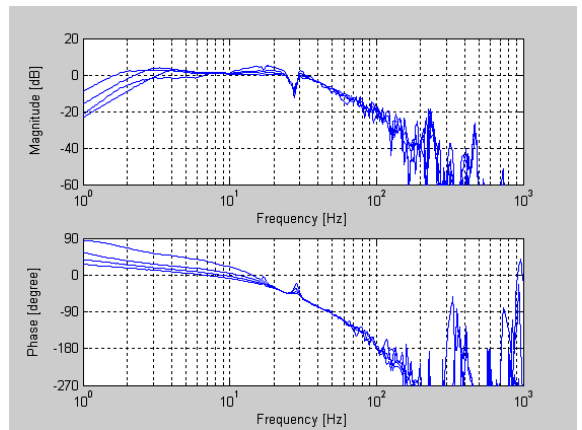


Fig. 7. Frequency response of the plant and  $G_c(s)$

안정화 제어기 및 외란관측기로 보상한 안정화루프의 개루프 주파수응답은 Fig. 9와 같다. 이때 개루프 시스템 대역폭은 약 55 Hz이고, 이득여유와 위상여유

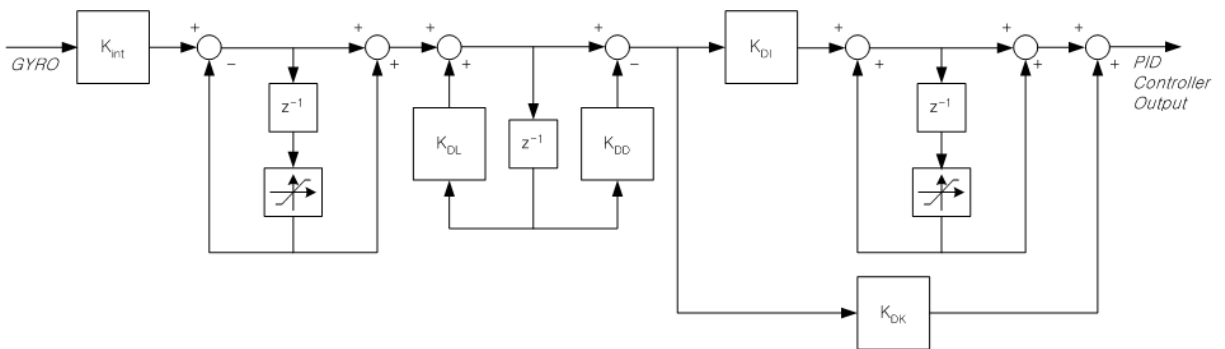


Fig. 8. Digital stabilization controller model

는 각각 10 dB와 40° 이다. 한편, 외란관측기 성능과 비교를 위하여 동일 조건에서 설계된 PID 제어기 전달함수는 식 (24)와 같다.

$$G_P(s) = \frac{30.0(s + 2\pi \cdot 2)(s + 2\pi \cdot 7.2)}{s^2(s + 2\pi \cdot 100)} \quad (24)$$

식 (24)로 보상한 경우 이득은 절점주파수(cutoff frequency) 부근에서 자이로의 영향으로 -20 dB/decade 이상의 기울기로 감소하지만, 제안된 외란관측기로 보상한 경우 절점주파수 부근에서 -20 dB/decade의 기울기로 감소한다. 여기서 제안된 외란관측기는 플랜트 동특성을 모델 동특성으로 변환시키기 위하여 일종의 진상 역할을 하게 된다. 따라서 위상은 더욱 높은 주파수에서 -180°를 통과한다. 이에 따라 제안된 외란관측기를 적용하므로써 더욱 높은 대역폭을 구현할 수 있었다.

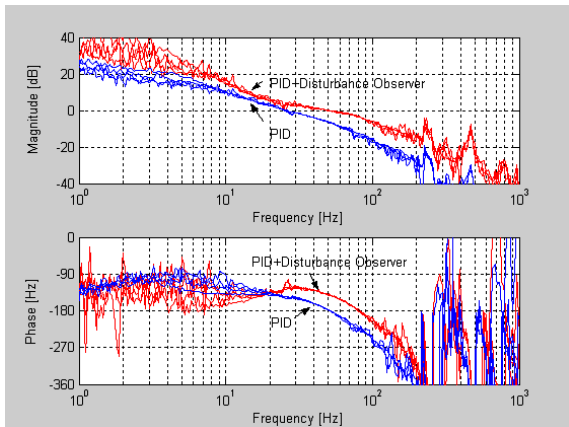


Fig. 9. Open loop frequency response

Fig. 10은 계단응답을 측정한 것이다. 외란관측기 도입으로 안정화구동기의 불확실성 보상 및 대역폭 증가로 기준입력에 대한 상승시간이 감소하며, 위상여유 증가로 인하여 오버슈트가 감소한다. 측정신호는 D/A 변환기에서 측정하였으며, DOB 보상신호로 인하여 잡음이 큰 것과 같이 측정되었다.

Fig. 11은 약 28 oz-in에 해당하는 계단 토크외란을 서보증폭기로 인가한 경우 각속도 출력 및 외란관측기 보상신호이다. 외란관측기는 외란이 발생하는 순간 보상신호를 출력하며, 외란 감쇠성능은 약 3배 개선됨을 알 수 있다.

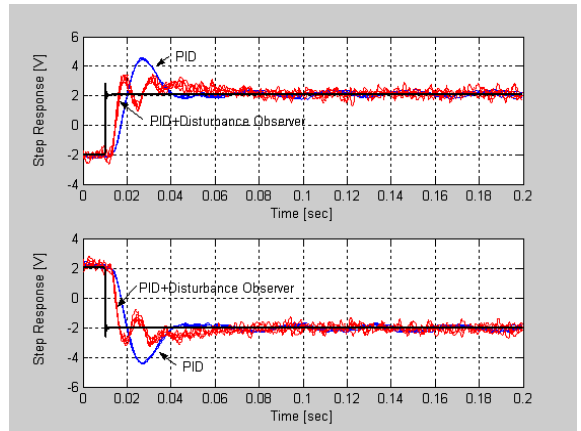
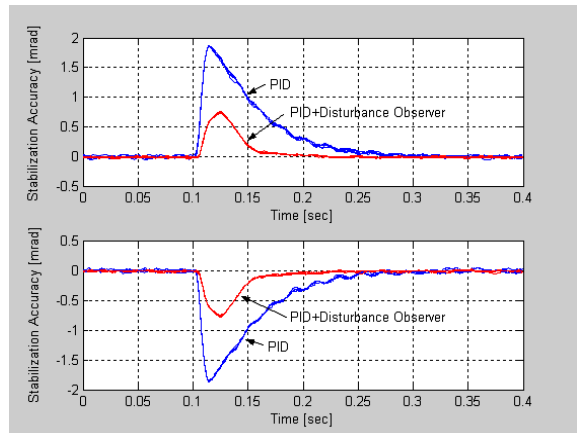
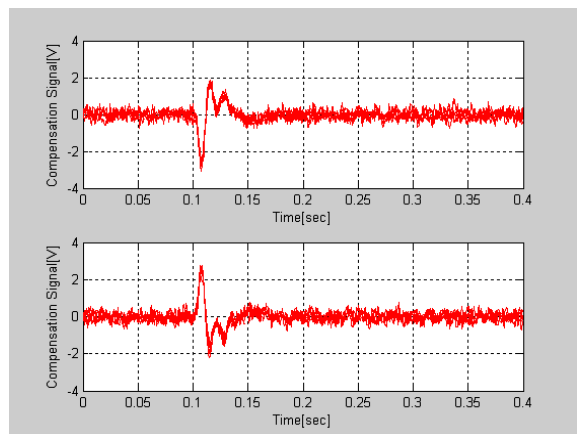


Fig. 10. Step response



(a) Angular velocity



(b) Compensation signal

Fig. 11. Performance for the torque disturbance

## 5. 결 론

본 논문에서는 새로운 구조의 강건한 외란관측기 구조를 제안하였으며, 주파수영역에서 고전제어이론을 바탕으로 설계방안을 제시하였다. 제안된 외란관측기는 안정한 플랜트에 대하여 내부 안정도가 보장됨을 보였으며, EOTS의 안정화구동기에 적용하여 불확실성 보상 및 성능개선 결과를 보였다.

## References

- [1] K. Ohnishi, "A New Servo Method in Mechatronics," Trans. Japanese Society of Electrical Engineers, Vol. 107D, pp. 83-86, 1987.
- [2] T. Umeno, T. Kaneko and Y. Hori, "Robust Servosystem Design with Two Degree of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulator," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 40, No. 5, pp. 473-485, 1993.
- [3] H. S. Shin, K. Fujiune, T. Suzuki, S. Okuma, K. Yamada, "Positioning Control of Direct Drive Rotor with Two-degree-of-freedom Compensator," IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 3137-3142, 1995.
- [4] M. Tomizuka, "Robust Digital Motion Controllers for Mechanical Systems," Robotics and Autonomous System, pp. 143-149, 1996.
- [5] Y. J. Choi, K. J. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, I. H. Suh, "On the Robustness and Performance of Disturbance Observer for Second-order System," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 48, pp. 315-320, 2003.
- [6] B. K. Kim, W. K. Chung, "Advanced Disturbance Observer Design for Mechanical Pointing Systems," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 50, pp. 1207-1216, 2003.
- [7] J. K. Park, S. Jung, "An Experimental Study on Coordinates Tracker Realization for EOTS Slaved to the Radar of a Helicopter," ICASE, Vol. 11, pp. 369-377, 2005.
- [8] J. K. Park, Y. G. Bae, and S. Jung, "Experimental Studies of a Time-delayed Controller to Stabilize Image Stabilization System," ICASE, Vol. 13, pp. 58-64, 2007.
- [9] John C. Doyle, Bruce A. Francis, Allen R. Tannenbaum, Feedback Control Theory, Macmillan Publishing Company, 1992.